

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА ИХ ЗАРОЖДЕНИЯ И РОСТА

¹Ахкубеков А.А.*, ²Ахкубекова С.Н., ¹Узденов Э.М., ¹Хаджиева М.Т.

¹*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова*

²*Кабардино-Балкарский аграрный университет им. В.М. Кокова*

*dis1@kbsu.ru

Впервые показано, что в основе формирования интерметаллидов существенную роль играют такие процессы как самоорганизация, самосборка, способствующие упорядочиванию в определенные структуры, минимизируя свою энергию и формируя стабильные металлические соединения. Отмечена также ключевая роль в формировании и стабилизации интерметаллических соединений, принципа комплементарности, основанной на атомно-молекулярном распознавании компонентов «гость-хозяин».

Ключевые слова: интерметаллид, процесс, синтез, механизм, зарождение, рост, структура.

METHODS OF SYNTHESIS OF INTERMETALLIDES AND FEATURES OF THE MECHANISM OF THEIR ORIGIN AND GROWTH

¹Akhkubekov A.A., ²Akhkubekova S.N., ¹Uzdenov E.M., ¹Khadjieva M.T.

¹*Kabardino-Balkarian State University*

²*V.M. Kokov Kabardino-Balkarian Agrarian University*

It is shown for the first time that such processes as self-organization and self-assembly play an essential role in the formation of intermetallides, which help to organize into certain structures, minimize their energy and form stable metal compounds. The key role in the formation and stabilization of intermetallic compounds of the complementarity principle based on the atomic-molecular recognition of the "guest-host" components is also noted.

Keywords: intermetallic compound, processes, synthesis, mechanism, origin, growth, structure.

Введение

Интерметаллиды – нестехиометрические химические соединения, состоящие из двух или более атомов различных металлов и / или металлоидов [1–4], составляющие обширный класс неорганических веществ. Формулы этих соединений указывают лишь на соотношение компонентов в их кристаллических решетках. Интерметаллиды в отличие от исходных составляющих могут обладать многими свойствами одновременно, в зависимости от условий синтеза: температуры, давления, скорости охлаждения и др. [4, 5]. В целом они представляют собой особый класс химсоединений, которые существуют исключительно в твердой фазе [6–8].

Объяснение зарождения и роста интерметаллидов основывается в основном экспериментальными данными. Как известно, взаимодействие между атомами металлов, их сплавами описываются химическими связями, связь же между электронным состоянием компонентов и структурой интерметаллидов пока исследована не полностью. Это отразилось на классификации металлов и сплавов, например, латунь и бронзу обычно считают сплавами, на самом же деле это химсоединения между металлами.

Таким образом, к настоящему времени не установлена физическая природа зарождения интерметаллидов, не раскрыта связь между их кристаллической и электронной структурами, что требует дополнительного междисциплинарного подхода к решению этой задачи.

Рассмотрение указанных выше проблем начнем с анализа работ, посвящённых методам синтеза интерметаллидов.

В настоящее время интерметаллиды получают различными методами [5–18]. Остановимся более подробно на некоторых из них, например, [6, 9], в которых отражены основные методы синтеза интерметаллидов, их достоинства и недостатки.

Анализ содержания работ [6, 9] показывает, что такие методы, как спекание и сплавление позволяют получать массивные образцы, однако, требуют дополнительных обработок. Алюмотермия и гидритно-кальциевое восстановление подходят для равновесных интерметаллидов, но требуют сложных технологических процессов и могут иметь низкую производительность. Механохимический и самораспространяющийся высокотемпературный синтез также имеют свои ограничения, такие как высокая энергоёмкость процесса, а соответственно, и высокая себестоимость. Деформационные методы и аддитивная технология предлагают некоторые преимущества, но также имеют свои недостатки. В указанных работах анализируется и много других методов.

В то же время в перечне методов синтеза интерметаллидов, приведенных в таблицах [6, 9] *не рассматривается метод диффузионных пар* (метод контактного плавления) [9], хотя указанные методы широко используются при исследовании структуры диффузионных зон [19], при синтезе интерметаллидов и раскрытии механизма их образования [16].

Контактное плавление (КП) представляет собой уникальный инструмент для доступа к многофазовому пространству, что делает его чрезвычайно полезным при исследовании структуры интерметаллидов и их свойств. Контактное плавление тесно связано с диаграммами состояния. Уникальность КП состоит ещё и в том, что всегда сопровождается образованием эвтектики в контакте соприкасающихся фаз при температуре ниже температуры плавления низкоплавкого компонента [14–18 и др.]. Нам представляется, что утверждение автором работы [9]: «...этот метод (*диффузионных пар (контактное плавление)*) не является промышленным...», связано с тем, что не учитываются режимы проявления контактного плавления: кинетический, стационарно – диффузионный или не стационарно-диффузионный режимы [16]. Так как большинство систем, используемых для синтеза интерметаллидов являются эвтектическими, то синтез должен сопровождаться обязательно КП, протекающим в зависимости от условий в указанных выше режимах. Например, при формировании зоны взаимодействия на межслойной границе, сваренного взрывом различных композитов [18], контактное плавление может протекать в одном из указанных выше режимах. Поэтому, когда речь заходит об использовании метода диффузионных пар, следует учитывать агрегатное состояние переходной зоны: жидкофазное оно или твердофазное.

Сравнивая перечисленные методы синтеза интерметаллидов в [6, 9] с методом контактного плавления, можно сделать вывод, что контактное плавление является предпочтительным для выявления и изучения отдельных интерметаллидов.

Таким образом, приведенный выше анализ показывает, что метод синтеза интерметаллидов следует выбирать в зависимости от требуемых свойств и с учетом недостатков каждого метода.

В основе решения указанных проблем лежит раскрытие природы процессов зарождения и роста интерметаллидов. Решить эту проблему – значит упростить методы синтеза и управления их свойствами.

В связи с этим проведем анализ работ, посвящённых исследованию структурообразования, сопровождающегося зарождением интерметаллидов на межфазной границе твердое – жидкое.

В работе [20] отмечается чрезвычайная сложность процессов, протекающих на границе раздела в смеси порошков никеля и алюминия. Отмечается, что строгой теории диффузионного взаимодействия между твердым и жидким металлами в настоящее время не существует.

Авторы рассматривают возможные варианты протекания процесса:

– первый предполагает, что растворение твердого металла в жидком происходит за счет свободного перехода атомов через поверхность твердой фазы и последующего диффузионного переноса их в расплав;

– второй подразумевает металлохимическую реакцию при контакте твердого металла с жидким расплавом, что приводит к образованию интерметаллидного слоя на границе раздела компонентов;

– третий допускает диффузию атомов жидкой фазы в твердую, приводящую к образованию твердых растворов или интерметаллидов в приграничном слое.

На наш взгляд, наиболее углубленный подход к физике взаимодействия на границе жидкой и твердой фаз представлен в работе [21]. Подход в определенной степени соответствует второму варианту [20] и [22]. Существенным к ним добавлением является установленное автором [21] правило: «...позволяющее указать фазы, выделяемые в процессе распада метастабильных участков жидкой прослойки...», что способствует устойчивости концентрации жидкой фазы с твердым.

Однако, как отмечают авторы, ни одна из этих концепций пока не принята как окончательная, поэтому понимание механизмов, лежащих в основе образования и роста интерметаллидов, остается ключевым вопросом для дальнейших исследований в области материаловедения и металлургии.

Существенную роль в установлении природы механизма зарождения и роста интерметаллидов играет стадийность протекания процесса.

Примером, иллюстрирующим стадийность образования интерметаллидов, является исследование, проведенное в работе [22] в титано-алюминиевом композите. Отмечается, что процесс начинается с переноса атомов титана и алюминия через границу раздела с оксидами, что приводит к образованию локальных участков твердых растворов алюминия в титане (рис.1). Затем, в этих областях стохастически возникают зародыши интерметаллидов различного состава, преимущественно $TiAl_3$. После возникновения зародышей, начинается их рост, который продолжается до образования сплошной прослойки на границе раздела. Атомы титана, прошедшие через разрывы и цельные участки окисной пленки, растворяются в расплаве алюминия до достижения предела растворимости титана в алюминии, после чего начинается образование хаотически расположенных кристаллов избыточной интерметаллидной фазы $TiAl_3$.

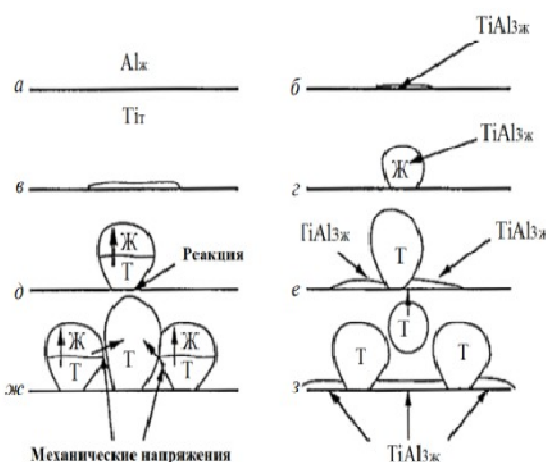


Рис.1 Формирование глобондов на поверхности раздела твердый (Т) Ti жидкий (Ж) Al: а-а – образование зародыша и превращение в тонкий слой интерметаллида; б – сфероидизация под действием поверхностного натяжения; в – отверждение и торможение реакции; г – формирование, сфероидизация и отверждение смежных глобондов $TiAl_3$ на вновь образовавшейся реакционной поверхности; з – отрыв глобонда [22].

Исследования, проведенные в [23–27], сфокусировались на изучении влияния давления на процессы формирования и роста интерметаллидов.

Например, в работе [23] подробно рассматривается влияние деформации изгиба на кинетику диффузии в сваренном взрывом композите. Результаты указывают на то, что энергия зарождения и роста интерметаллидной прослойки имеет обратную зависимость от степени деформации (рис.2),

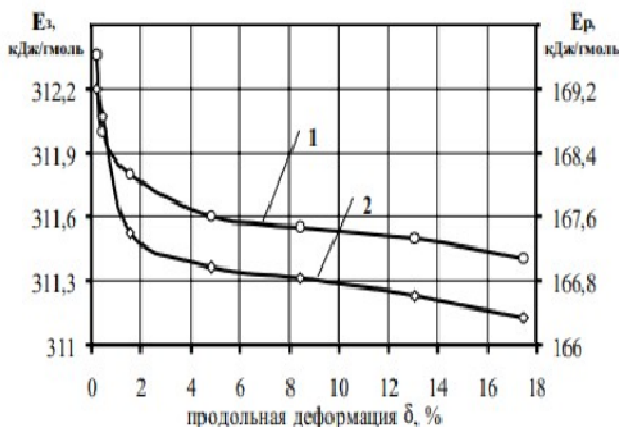


Рис.2. Зависимость энергии активации зарождения E_a 1 и энергии активации роста E_p 2 интерметаллидной

С нашей точки зрения, воздействие деформации на процессы фазообразования интерметаллидов может быть объяснено через концепцию «деформационного индуцированного зарождения фаз (ДИЗФ)». Деформация вызывает перемещение атомов [28, 29], изменяя их распределение в кристаллической решетке металла и создавая механическое напряжение в атомной структуре материала. Это напряжение, вероятно, может быть релаксировано через образование интерметаллидов более энергетически выгодных фаз, которые становятся более устойчивыми в новых условиях.

В работах [30–33] отмечается, что температура играет существенную роль в процессе формирования и роста интерметаллидов. Увеличение температуры приводит к активации химических реакций, что ускоряет скорость образования и роста интерметаллидов.

Мы предполагаем, что повышение температуры во время фазообразования также может инициировать процесс ДИЗФ. В данном случае при повышении температуры происходит активация процессов в материале аналогично влиянию деформации. Процесс ДИЗФ сопровождается усилением миграции атомов под воздействием теплового воздействия, что в конечном итоге приводит к формированию интерметаллидов.

Тем не менее следует отметить, что интерметаллиды могут зарождаться не только при повышении температуры, но и при ее понижении. Мы также предполагаем, что процесс ДИЗФ происходит не только при повышении температуры, но и при ее понижении. Этот феномен иллюстрируется в работе [34], где указывается, что при охлаждении из твердого раствора выделяются интерметаллидные фазы.

В свете предыдущего обсуждения о влиянии температуры на процессы зарождения интерметаллидов следует также рассмотреть важность диффузии и ее влияние на этот процесс при контакте твердого и жидкого состояний.

В работе [35] рассмотрен процесс образования интерметаллидов при взаимодействии жидкотвердых фаз алюминия и титана. Этот процесс описывается последовательностью стадий, начиная с инициации, роста и завершения. На стадии инициации наблюдается медленный перенос атомов титана и алюминия через слой оксидов, что способствует формированию тонкой интерметаллидной прослойки. В период роста происходит увеличение скорости диффузии, стимулируя активный рост толщины интерметаллидного слоя. На последней стадии насыщения формируется дисперсная фаза интерметаллида в диффузионном слое.

В работе [8] рассматривается процесс формирования интерметаллического слоя в системе Cu–Sn. Основным интерметаллическим соединением в этой системе является Cu_6Sn_5 . Начальная стадия роста кристаллов фазы Cu_6Sn_5 происходит быстро, но с увеличением толщины слоя скорость роста замедляется из-за изменения механизма диффузии: на начальной стадии диффузия происходит через жидкую фазу, а на более поздних стадиях – через твердую фазу Cu_6Sn_5 . В работе так же обсуждается формирование промежуточного слоя Cu_3Sn между слоем меди и Cu_6Sn_5 .

В обоих случаях диффузия является ключевым механизмом, способствующим формированию интерметаллических соединений. Как и все самопроизвольные физические или химические процессы диффузия стремится к состоянию минимальной свободной энергии или к состоянию равновесия [36]. В рассмотренных случаях помимо влияния температуры, диффузия играет существенную роль, активируя процесс ДИЗФ, который становится ключевым фактором в формировании интерметаллидных структур.

В свете обсуждения о самопроизвольных процессах, таких, как диффузия, следует рассмотреть более сложные аспекты организации материи: самоорганизация и самосборка.

Самоорганизация и самосборка [37–40], являющиеся ключевыми принципами в науке о материалах, играют существенную роль в формировании интерметаллических структур. Именно эти процессы определяют конфигурацию атомов в материале и его функциональные свойства.

Процессы самоорганизации и самосборки, присутствующие как в росте интерметаллидов, так и в супрамолекулярных системах, являются ключевыми механизмами, определяющими структуру и свойства этих материалов. Интерметаллиды, образующиеся в результате взаимодействия металлических элементов, также проявляют подобные черты самоорганизации и самосборки на молекулярном уровне.

Подобно супрамолекулярным системам, интерметаллиды формируются за счет специфических нековалентных взаимодействий между атомами металла. Эти взаимодействия позволяют атомам организовываться в определенные структуры, минимизируя свою энергию и обеспечивая устойчивость всей

системы. Таким образом, интерметаллиды являются примером супрамолекулярных систем на макрокопическом уровне, где слабые межмолекулярные силы регулируют их структуры и свойства.

Кроме того, существует еще один важный аспект в исследованиях супрамолекулярных систем и интерметаллидов – комплементарность.

Комплементарность [40–42] – взаимное соответствие в химическом строении взаимодействующих молекул, структур или характеристик для создания более устойчивой или функциональной системы.

Исследования, проведенные в работе [6], направлены на выявление факторов, способствующих стабилизации процесса образования интерметаллических соединений. Хотя в исследовании [6] конкретно не упоминается термин «комплементарность», выявлены три ключевых фактора – электронная концентрация, тенденция к максимальному заполнению пространства и различие электроотрицательностей компонентов – которые считаются критериями комплементарности.

Первый критерий – электронная концентрация, указывает на необходимость определенного соотношения между количеством электронов и числом атомов в элементарной ячейке. Это свидетельствует о том, что для обеспечения устойчивости интерметаллического соединения важно, чтобы каждый атом имел определенное количество электронов, что подчеркивает взаимосвязь между элементами системы.

Второй критерий – тенденция к максимальному заполнению пространства, отражает стремление системы к наиболее компактной упаковке атомов. Это позволяет максимально эффективно использовать доступное пространство и обеспечивает стабильность структуры интерметаллида.

Наконец, различие электроотрицательностей компонентов указывает на наличие взаимодействия между атомами с разными электронными характеристиками. Это позволяет создавать более сложные и устойчивые структуры, обеспечивая, таким образом, комплементарность взаимодействующих компонентов.

Таким образом, даже если эти концепции не упоминаются явно, как комплементарность в исследовании [6], они на самом деле представляют собой критерии комплементарности, поскольку подчеркивают важность взаимосвязи и взаимодействия различных элементов для обеспечения стабильности и устойчивости интерметаллических соединений.

Для зарождения интерметаллида каждый атом должен чувствовать себя «уютно», то есть соответствуя принципу «гость-хозяин» [39–41] это означает, что внутренние условия должны быть такими, чтобы стимулировать образование и укрепление связей между «своими» атомами, что в конечном итоге приводит к стабильной и устойчивой структуре интерметаллида.

Заключение

Методы синтеза интерметаллидов следует выбирать с учетом требуемых свойств и их недостатков.

Контактное плавление является предпочтительным методом при исследовании фазовых переходов первого рода в контакте разнородных металлов, сопровождающихся зарождением интерметаллидов.

Показано, что в основе формирования интерметаллидов существенную роль играют такие процессы как самоорганизация, самосборка, способствующие самостоятельно упорядочиваться в определенные структуры, минимизируя свою энергию и формируя стабильные металлические соединения.

Показана ключевая роль молекулярно-атомного распознавания компонентов «свой–чужой» в формировании и стабилизации интерметаллических соединений, т. е. комплементарность – это взаимное соответствие участников субструктуры и рецептуры.

Библиография

1. Харина Г.В. Химические свойства конструкционных металлов и сплавов. Екатеринбург: РГППУ. 2019. 153 с.
2. Ковтунов А.И. Интерметаллидные сплавы. Тольятти: ТГУ, 2018. 77 с.
3. Напалков В.И., Попов Д.А., Афанасьев А.Е. Структуры и дефекты слитков из алюминия и его сплавов. Красноярск: СФУ, 2018. 172 с.
4. Интерметаллиды – все самое интересное на ПостНауке // <https://postnauka.org/video/80315>.
5. Hardt A.P., Phung P.V. Propagation of gasless reactions in solids – I. Analytical study of exothermic intermetallic reaction rate // *Combustion and Flame*. 1973. V. 21, № 1. P. 77–89.
6. Сурков В.А. Анализ методов получения интерметаллидов p, d-металлов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. С. 27–33.

7. Сурков В.А. Анализ структуры и фаз интерметаллических соединений металлов на основе порошковых систем р, d-металлов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. С. 33–38.
8. Бондарь А.А., Агейкова Л.Н., Демьянов Б.Ф. Рост интерметаллидов и образование переходного слоя в зоне контакта меди с жидким оловом // Ползуновский вестник. 2019. № 2. С. 133–137.
9. Ибраева Г.М. Многослойная структура интерметаллидных соединений алюминидов кобальта, никеля и титана: дис. ... док. фил. (Phd) наук. Республика Казахстан. Алматы, 2019. 91 с.
10. Каминский В.В., Петрович С.Ю., Липин В.А. Получение интерметаллидов в системе Al–Ti–Zn // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 512–517.
11. Марыгина Ю.И., Калужина С.А., Протасова И.В. Фазовый состав и морфология поверхности Ni, Zn-сплава, электроосажденного из сульфатно-аммонийного раствора // Конденсированные среды и межфазные границы. Т. 20, № 1. С. 93–101.
12. Тиунов И.А., Медведева Н.А., Петухов И.В. Получение, свойства Ni–P–Ni₅La_xCe_(1-x) покрытий и их электрохимическая активность в реакции выделения водород // Вестник Пермского университета. Серия: Химия. 2013. № 3. С. 53–60.
13. Маркович С.И., Попова А.В., Семушин В.В., Кузнецов С.А. Электрохимический синтез интерметаллических соединений кобальта с неодимом в хлоридных расплавах // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение. Вып. 5. 2021. Т. 11, № 2. С. 169–173.
14. Саратовкин Д.Д., Савинцев П.А. Образование жидкой фазы в месте контакта двух кристаллов, составляющих эвтектическую пару // Докл. АН СССР. 1941. Т. 33, № 4. С. 303–304.
15. Мелких А.В. Теплофизика А.В. СПб.: Лань, 2023. 216 с.
16. Ахкубеков А.А., Орквасов Т.А., Созаев В.А. Контактное плавление металлов и наноструктур на их основе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 147 с.
17. Хайрулаев М.Р. Контактное плавление в бинарных системах с химическим взаимодействием компонентов: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик: Изд-во КБГУ, 1975. 150 с.
18. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Евстропов Д.А., Кулевич В.П., Бондаренко Ю.И. Формирование зоны взаимодействия на границе соединения меди с титаном при контактном плавлении // Технические науки в мире: от теории к практике: сборник научных трудов по итогам междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону. 2014. С. 90–99.
19. Паничкин А.А. Исследования формирования структуры диффузионной зоны в бинарных системах Cu–Ni, Bi–Si и Mg–Cd методом диффузионных пар: автореф. дис. ... кан. тех. наук. Алматы. 2006. 20 с.
20. Ковалев О.Б., Неронов В.А. Металлохимический анализ реакционного взаимодействия в смеси порошков никеля и алюминия // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 52–60.
21. Саввин. В.С. Фазовые переходы первого рода в контакте разнородных металлов: дисс. ... док. физ.-мат. наук. Екатеринбург. 2009. 303 с.
22. Гуревич Л.М. Механизмы структурообразования при взаимодействии титана с расплавом алюминия // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6 (109). С. 6–13.
23. Трыков Ю.П., Гуревич Л.М., Жоров А.Н., Гурулев Д.Н. Влияние деформации изгиба на кинетику диффузии в сваренном взрывом композите ОТ4 – АД1 – АМГ6 // Перспективные материалы. 2003. № 6. С. 76–80.
24. Гуревич Л.М., Слаутин О.В., Пушкин М.С., Иноземцев А.В., Пацелов А.М., Харламов В.О. Образование интерметаллидов при сварке взрывом и последующем нагреве // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 2 (181). С. 7–12.
25. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Евстропов Д.А., Новиков Р. Е. Фазовый состав и микромеханические свойства покрытий системы Al–Ti–Cu, формируемых при жидкофазном взаимодействии на медных подложках // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 4 (14). С. 9–11.
26. Шморгун В.Г., Серов А.Г., Слаутин О.В., Кузнецов С.А., Малых А.В. Формирование зоны взаимодействия на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0+МН45 при контактном плавлении // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 4. (239). С. 7–13.
27. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Арисова В.Н., Евстропов Д.А. Исследование фазового состава диффузионной зоны в композите системы медь-титан // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6. (109). С. 32–35.

28. Травкина О.С. Процессы массопереноса в системах с участием твердой фазы Уфа: УГНТУ. 2019. 145 с.
29. Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Грязнов М.Ю. Физика новых материалов: учебное пособие. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2010. 105 с.
30. Шморгун В.Г., Богданов А.И. Моделирование полей напряжений, возникающих в композитах системы Ni–Al после диффузионного отжига // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6 (109). С. 18–21.
31. Шморгун В.Г., Трыков Ю.П., Богданов А.И., Слаутин О.В., Арисова В.Н., Голубин С.Н. Влияние термической обработки на структуру и свойства участков оплавленного металла в слоистом композите системы Ni–Al // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6. (109). С. 24–28.
32. Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Арисова В.Н., Евстропов Д.А. Исследование фазового состава диффузионной зоны в композите системы медь–титан // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. № 6. (109). С. 32–35.
33. Михеев Р.С., Коберник Н.В., Калашников И.Е., Болотова Л.К., Колмаков А.Г. Исследование механизма образования интерметаллидов при синтезе функционально-градиентных слоистых сталесплавных композиций // Новые материалы и перспективные технологии: сборник материалов пятого междисциплинарного научного форума с международным участием. 2019. С. 696–698.
34. Николаева Е.П., Сорокова С.Н. Аэрокосмические материалы. Иркутск: ИРНТУ, 2021. 246 с.
35. Гуревич Л.М., Трыков Ю.П., Жоров А.Н., Гурулев Д.Н., Локтюшин В.А. Структурообразование в титано-алюминиевых композитах в присутствии жидкой фазы // Журнал функциональных материалов. 2008. Т. 2, № 4. С. 153–157.
36. Campbell C.E., Zhao J-C., Henry M.F. Comparison of experimental and simulated multicomponent Ni-base super-alloy diffusion couples // J Phase Equilib, Diff. 2004. № 25. P. 6–15.
37. Самоорганизация колебаний в атомах и молекулах // <https://megaobuchalka.ru/17/11108.html>.
38. Лебедев-Степанов П.В. Введение в самосборку ансамблей наночастиц. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
39. Супрамолекулярная система – это место, где рождаются свойства материала <http://www.sinp.msu.ru/ru/post/13205>
40. Первов В.С., Михайкин И.Д., Махонина Е.В., Буцкий В.Д. Супрамолекулярные ансамбли в эвтектических сплавах // Успехи химии. 2003. Т. 72, вып. 9. С. 852–863.
41. Кулагина Е.М., С.В. Шилова С.В., Галяметдинов Ю.Г. Биополимеры в супрамолекулярных системах. Казань: КНИТУ, 2020. 84 с.
42. Блинов Л.Н. Гутенев М.С., Перфилова И.Л., Соколов И.А. Химия. СПб.: Лань, 2022. 474 с.